EXERCICE III. DES CINÉMOMÈTRES (5 POINTS)

La mesure de vitesse intervient dans un très grand nombre de procédés technologiques dans des domaines très variés : industrie, médecine, sport, transport, aérospatiale, …

Les dispositifs de mesure de vitesse sont généralement appelés cinémomètres. Les cinémomètres les plus courants peuvent être classés en deux catégories : les « cinémomètres Doppler » et les « cinémomètres laser ».

Cet exercice s'intéresse à certains aspects du fonctionnement et de l'utilisation de ces deux types d'appareils pour mesurer la valeur de la vitesse d'une « cible » dont la nature dépend du domaine d'application.

1. Cinémomètre Doppler

Ce type d'appareil utilise une onde électromagnétique monochromatique. Il comprend essentiellement : un émetteur qui génère une onde de fréquence f_0 = 24,125 GHz, un récepteur qui reçoit cette onde après réflexion sur la " cible " et une chaine de traitement électronique qui compare le signal émis et le signal reçu.
Si la " cible " visée a une vitesse non nulle par rapport au cinémomètre, l'appareil produit un signal périodique dont la fréquence, appelée « *fréquence Doppler* », est proportionnelle à la vitesse de la " cible ".

Données :

- Relation, en première approximation, entre la « fréquence Doppler » et la vitesse de la " cible " :

$$f_D = \frac{2.f_0.v_r}{c}$$

f_D : fréquence Doppler
f_0 : fréquence de l'émetteur
v_r : vitesse relative à la "cible" par rapport à l'émetteur
c : vitesse de la lumière dans le vide

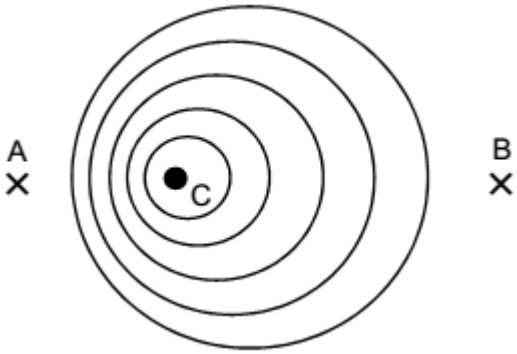
- Célérité des ondes électromagnétiques dans le vide ou dans l'air :

$$c = 3{,}00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

1.1. Les cinémomètres Doppler utilisent l'effet Doppler. Expliquer en quelques lignes en quoi consiste ce phénomène.

Un cinémomètre Doppler immobile est utilisé pour mesurer la vitesse d'une " cible " qui s'approche de lui. Les ondes électromagnétiques émises sont réfléchies par la " cible " avant de revenir au cinémomètre.

1.2. La figure ci-contre modélise de manière très simplifiée l'allure des ondes réfléchies par cette " cible ", notée C.
Déterminer, en explicitant le raisonnement suivi, si le cinémomètre Doppler est situé au point A ou au point B.



1.3. Un cinémomètre Doppler est utilisé pour mesurer la vitesse des balles de tennis lors des principaux tournois internationaux comme celui de Roland Garros. Au cours de ce tournoi, lors d'un service, l'appareil mesure une fréquence Doppler de valeur f_D = 7416 Hz.

1.3.1. Calculer la valeur de la vitesse de cette balle.

1.3.2. Ce résultat est-il cohérent avec celui affiché sur la photographie ci-dessous prise lors de ce service ?



2. Cinémomètre laser

Le principe de la mesure de vitesse grâce à cet instrument est basé sur une mesure de la distance séparant la "cible" du cinémomètre laser. On mesure le temps mis par une impulsion laser pour atteindre la "cible" visée et revenir au cinémomètre après réflexion. Un compteur électronique de temps est déclenché lorsque l'impulsion est émise par le laser et arrêté lorsque l'impulsion « retour » est détectée. Connaissant la durée d'un aller-retour ainsi que la vitesse de la lumière, on en déduit la distance laser-cible. Pour connaître la vitesse de la "cible", il suffit de répéter le processus de mesure de distance à des intervalles de temps fixes.

Données :

- Valeur de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique utilisée par un cinémomètre laser :
$$\lambda = 904 \text{ nm}$$
- Durée entre l'émission de deux impulsions laser consécutives :
$$T = 100 \text{ µs}$$
- Exploitation d'une série de mesures d'une grandeur X :

Pour une série de mesures pour lesquelles on suppose les conditions de répétabilité vérifiées, on admet que :

- la meilleure estimation de la valeur x de la grandeur X est égale à la moyenne $\overline{x}$ des N valeurs mesurées ;
- la meilleur estimation de l'incertitude de mesure de la grandeur X, avec un niveau de confiance de 95% s'écrit :

$$U_x = 2 \times \frac{s_{n-1}}{\sqrt{N}}$$

N : nombre de valeurs disponibles

s_{n-1} : écart-type expérimental tel que :

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \times \sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2}$$

2.1. Expliquer le principe de l'émission stimulée et donner les principales propriétés du laser.
2.2. À quel domaine spectral appartient l'onde électromagnétique utilisée dans le radar laser étudié ?

2.3. Dans un processus de production industrielle, un cinémomètre laser en cours de réglage a effectué très rapidement une série de 10 mesures à intervalle de temps fixe. On obtient les résultats suivants :

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v (m.s^{-1})	3,4	3,8	3,9	3,7	3,6	3,7	3,5	3,8	3,7	3,6

2.3.1. Évaluer le résultat de la mesure en faisant apparaître la valeur de l'incertitude avec un niveau de confiance de 95% et présenter le résultat sous la forme :

$$v = \overline{v} \pm u_V$$

v : vitesse du véhicule (m.s^{-1})
$\overline{v}$: meilleure estimation de la valeur de la vitesse (m.s^{-1})
u_V : meilleure estimation de l'incertitude associée à la mesure (m.s^{-1})

2.3.2. Pour le processus considéré, on souhaite disposer d'une incertitude relative inférieure ou égale à 3%. Cette condition est-elle vérifiée pour le résultat précédent ?

2.4. Afin de déterminer la vitesse d'une "cible", le cinémomètre radar réalise plusieurs mesures de durée de parcours d'impulsions lumineuses.

2.4.1. Pour deux impulsions successives émises par le cinémomètre laser, montrer que la vitesse de la "cible" s'écrit :

$$v = c.\frac{|\tau - \tau'|}{2T}$$

v : vitesse du véhicule cible
c : vitesse de la lumière
T : durée écoulée entre deux impulsions successives
τ : durée mise par la première impulsion pour parcourir un aller-retour
τ' : durée mise par la deuxième impulsion pour parcourir un aller-retour

2.4.2. Dans le cas étudié à la question 2.3, montrer en raisonnant sur les ordres de grandeur, qu'il est techniquement très difficile de réaliser une mesure de la différence de durées $|\tau - \tau'|$. Expliciter le raisonnement.